

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření charakteristik regulačních ventilů na vodní trati

Measurement of the Characteristic of the Control Valves for the  
Water Circuit

Student :

Vít Buryan

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jana Jablonská, Ph.D.

Ostrava 2020

## Zadání bakalářské práce

Student: **Vít Buryan**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení  
Téma: **Měření charakteristiky regulačních ventilů na vodní trati**  
**Measurement of the Characteristics of the Control Valves for the Water Circuit**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte teorii o měření statických charakteristik armatur.
2. Sestavte a popište měřicí trať.
3. Vytvořte metodiku měření statických charakteristik ventilů a proveďte měření.
4. Vyhodnoťte naměřená data graficky.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] JANALÍK, J.; ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2002, 125s. ISBN 80-248-0038-1.
- [2] DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin*. [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 257 s. [cit. 2016-10-05]. ISBN 978-80-248-1508-4.  
Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>.
- [3] ČSN EN 1267 *Průmyslové armatury – Měření průtokových ztrát s použitím vody jako zkušební tekutiny*. 2012.
- [4] ČSN EN 60534-2-3 *Regulační armatury pro průmyslové procesy – Část 2-3: Průtok – Zkušební postupy*. 1999.
- [5] ROČEK, J. *Průmyslové armatury*. Praha: Nakladatelství Informátorku, spol. s r.o., 2002. 204 s.
- [6] DOUBRAVA, J. a kol. *Regulační armatury*. Česká Třebová: LDM, spol. s r.o., 2006, 168 s.
- [7] ZAPPE, R. W. *Valve selection handbook*. Houston: Gulf Publishing Company, 4. vyd., ISBN 0-88415-886-1.
- [8] Team of authors. *Manual of Water Supply Practices. Quarter-Turn Valves: Torque, Head Loss, and Cavitation Analysis*. 3. vyd., 2017. 147 s.
- [9] ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. 1997.
- [10] ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. 1996.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Jablonská, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



---

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík  
vedoucí katedry



---

prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



**Místopřísečné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....18.5.2020.....

.....  
Vít Buryan  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18.5.2020

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Vít Buryan

Adresa trvalého pobytu autora práce: Hlavní 160, Zbyslavice, 742 83

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BURYAN, V. *Měření charakteristik regulačních ventilů na vodní trati: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2020, 46 s. Vedoucí práce: Jablonská, J.

Bakalářská práce se zabývá měřením charakteristik regulačních ventilů na vodní trati. V teoretické části jsou popsány fyzikální vlastnosti kapalin, průtokové a ztrátové součinitele, hydraulické odpory a regulační armatury. V praktické části je definován obvod pro měření statických charakteristik, pravidla pro montáž zkušebního vzorku a umístění odběrných míst pro měření tlaku. Metodika měření statických charakteristik je vytvořena na základě norem. Byly naměřeny 3 ventily (DN 25, DN 32 a DN 40) a pro každý z nich 4 různé zdvihy kuželky. V této práci je vyhodnoceno Reynoldsovo číslo, kavitační číslo, průtokový součinitel  $K_v$ , ztrátový součinitel  $\xi$  a tlakové ztráty v závislosti na průtoku pro všechny zdvihy kuželky. V práci je srovnána charakteristika ventilu DN 25 pro dvě teploty proudící kapaliny.

## ANOTATION OF BACHELOR THESIS

BURYAN, V. *Measurement of the characteristics of the control valves for the water: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical university of Ostrava, Ostrava, Faculty of mechanical engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2020, 46 p. Thesis head: Jablonská, J.

This bachelor thesis deals with measuring the characteristics of control valves on the water line. The theoretical part describes the physical properties of fluids, flow and loss factors, hydraulic resistances and control valves. The practical part defines the circuit for measuring static characteristics, rules for mounting the test sample and the location of points for measuring pressure. The methodology for measuring static characteristic is based on standards. Three valves were measured and four different plug strokes for each of them. In this work, the Reynolds number, cavitation number, flow coefficient  $K_v$ , loss coefficient  $\xi$  and pressure losses depending on the flow for all cone strokes are evaluated. The work compares the properties of a DN 25 valve for two temperatures of a flowing liquid.

## Obsah

Seznam použitých symbolů .....	8
Úvod .....	9
1. Tekutina .....	10
1.1 Fyzikální vlastnosti kapalin a rovnice kontinuity .....	11
1.2 Uzavírací armatury .....	14
1.3 Druhy proudění a bezrozměrná čísla .....	16
1.4 Ztráty – hydraulické odpory .....	18
2. Ztrátové součinitele pro ventily .....	20
2.1 Kavitace ventilu .....	21
3. Zkušební systém .....	22
3.1 Praktická část .....	25
3.2 Popis měřicího obvodu: .....	25
3.3 Prvky obvodu .....	27
4. Metodika vyhodnocení .....	32
4.1 Porovnání ventilů pro jejich plné otevření .....	35
4.2 Vyhodnocení součinitelů .....	36
5. Porovnání měření pro dvě různé teploty .....	39
6. Přesnost měření .....	40
ZÁVĚR .....	41
Citace .....	43
Přílohy .....	45

## Seznam použitých symbolů

$A_v$	Průtokový součinitel	$[m^2]$
$Ca$	Kavitační číslo	$[-]$
$C_v$	Průtokový součinitel ventilu	$[gallon \cdot h^{-1}]$
$d$	Vnitřní průměr trubky	$[m]$
$F$	Síla	$[N]$
$g$	Gravitační zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
$h$	Výška vodního sloupce	$[m]$
$K_v$	Průtokový součinitel	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
$l$	Délka potrubí	$[m]$
$m$	Hmotnost	$[kg]$
$p$	Tlak	$[Pa]$
$p_a$	Absolutní tlak	$[Pa]$
$p_w$	Tlak nasycených par	$[Pa]$
$p_0$	Atmosférický tlak	$[Pa]$
$p_1$	Přetlak	$[Pa]$
$p_2$	Podtlak	$[Pa]$
$Q$	Průtok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Re$	Reynoldsovo číslo	$[-]$
$S$	Plocha	$[m^2]$
$s$	Dráha	$[m]$
$S_x$	Celková chyba měření	$[\%]$
$t$	Čas	$[s]$
$V$	Objem	$[m^3]$
$v$	Rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
$\Delta h$	Ztrátová výška	$[m]$
$\Delta p$	Tlaková ztráta armatury	$[Pa]$
$\varepsilon$	Relativní drsnost stěny	$[-]$
$\lambda$	Součinitel tření	$[-]$
$\xi$	Součinitel místních ztrát	$[-]$
$\rho$	Hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\nu$	Kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$\eta$	Dynamická viskozita	$[Pa \cdot s]$



## Úvod

Bakalářská práce vznikla ve spolupráci s firmou Armatury Group a. s., která požadovala změřit charakteristiky regulačních armatur na vodní trati. Společnost používá ventily při proudění vodních par. Ventily již byly testovány při proudění plynů. Armatury se využívají v energetickém průmyslu. Vyhodnotil jsem charakteristiky ventilů pro proudění vody, která je v práci považována za nestlačitelnou kapalinu.

Tato práce popisuje regulační čtvrtotáčkové ventily tří různých světlostí, DN 25, DN 32 a DN 40. Ventily jsou měřeny pro čtyři různé zdvihy identifikované výrobcem, pro které vyhodnocuji charakteristiky.

V teoretické části se práce zabývá sestavením zkušebního obvodu, který jsem využíval pro stanovení charakteristik. Dále jsem vypsál tabulky pro správné připojení zkušebních vzorků a tlakových odběrů. Samotné měření na sestaveném měřícím obvodu probíhá v praktické části podle normy ČSN EN 60534-2-3.

V závěrečné části se věnuji vyhodnocení naměřených charakteristik pro ventil DN 25 pro dvě různé teploty.

# **1. Tekutina**

Látka, která se vždy nevratně deformuje a nemá vlastní tvar, proto vždy přejímá tvar nádoby. Tekutinu lze uvést do pohybu působením nepatrných sil. Výjimkou jsou newtonské kapaliny. Tekutina je spojitá a stejnorodé prostředí a vyznačuje se izotropií. Izotropie znamená, že každá částice má stejné vlastnosti nezávisle na poloze, působení sil nebo směru.

## **Ideální tekutina**

Ideální tekutina se uvažuje bez vnitřního tření a je dokonale nestlačitelná. Nejedná se o dokonalý popis skutečnosti, ale dovoluje odvodit složitější závislosti.

## **Dělení tekutin**

Tekutiny se dělí na stlačitelné a nestlačitelné. Nestlačitelné jsou takové, které působením tlaku nepatrně mění objem. Stlačitelné tekutiny se rozpínají, vyplňují celou a nevytvářejí volnou hladinu. Mohou to být páry nebo plyny, záleží, jak blízko se nacházejí bodu zkapalnění.

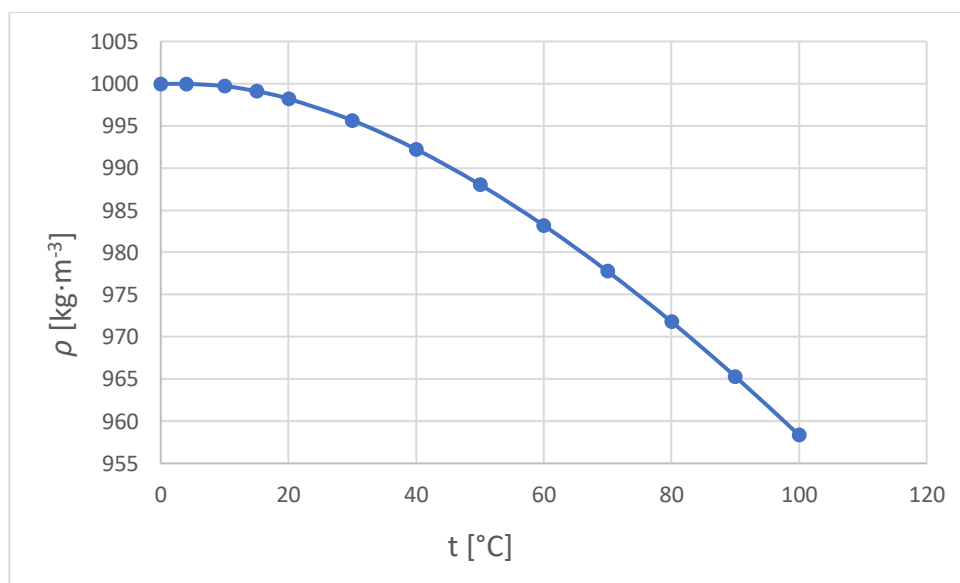
## 1.1 Fyzikální vlastnosti kapalin a rovnice kontinuity

### Viskozita

Viskozita je nejdůležitější parametr, který určuje tekutost kapaliny. Udává velikost odporu, který kladou částičky kapaliny vůči sobě při pohybu. Určuje se podle postupu stanoveného normou, a to měřením potřebného času k protečení daného množství kapaliny za dané teploty. Jednotkou kinematické viskozity je  $[m^2 \cdot s^{-1}]$ . Viskozita je závislá na teplotě a určuje se viskózním indexem. Čím je viskózní index kapaliny vyšší, tím méně je kapalina závislá na teplotě. Dynamická viskozita  $\eta$  je odpor, který kladou vrstvy kapaliny při vzájemném pohybu. Jednotkou je  $[Pa \cdot s]$ .

### Hustota

Hustota je fyzikální veličina, která je jednotkou soustavy SI a značí hmotnost objemové jednotky látky. Značí se  $\rho$  a její jednotkou je  $kg \cdot m^{-3}$ . Hustota vody je závislá na tlaku a teplotě.



Obr. 1 Závislost hustoty vody na teplotě

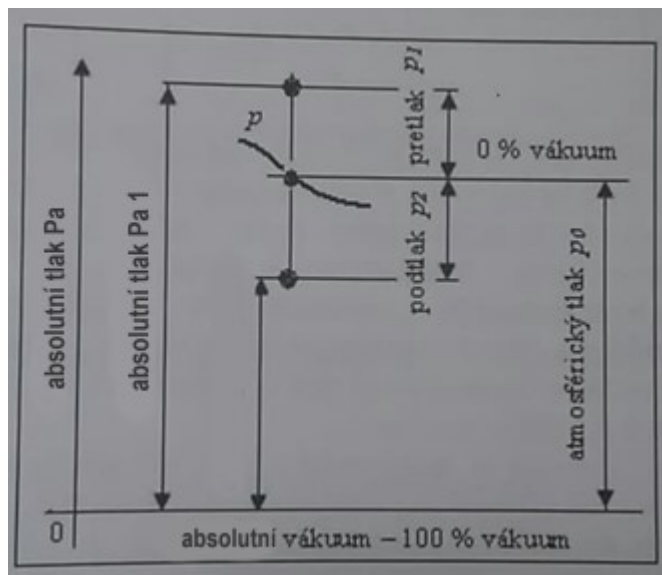
### Objemová stlačitelnost

Je to objemová změna, která je způsobená tlakem. Tato skutečnost se zohledňuje tam, kde jsou velké objemy kapaliny nebo při vysokých požadavcích na přesnost při nastavení polohy v regulačních obvodech.

## Atmosférický tlak $p_0$

Je to tlak ovzduší měřený na hladině Jadranského moře.

Absolutní tlak (obr. 1) je tlak měřený vůči vakuu a je roven relativnímu tlaku ( $p_1$ ) plus atmosférickému tlaku ( $p_0$ ). Kdežto relativní tlak ( $p_1$ ) je měřený vůči atmosférickému tlaku ( $p_0$ ) a je roven rozdílu absolutního tlaku ( $p_a$ ) a tlaku atmosférického.



Obr. 2 Druhy tlaků [9]

## Zákon zachování hmotnosti – rovnice kontinuity

Průtok  $Q$  je objem kapaliny  $V$ , který proteče za čas  $t$  průřezem  $S$ .

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

$$V = S \cdot s \quad (2)$$

Když dosadím za objem  $V$  v rovnici (3) plochu  $S$  a dráhu  $s$  dostanu:

$$Q = \frac{S \cdot s}{t} \quad (3)$$

Příčemž rychlost

$$v = \frac{s}{t} \quad (4)$$

Potom objemový průtok pro nestlačitelné kapaliny

$$Q = S \cdot v \quad (5)$$

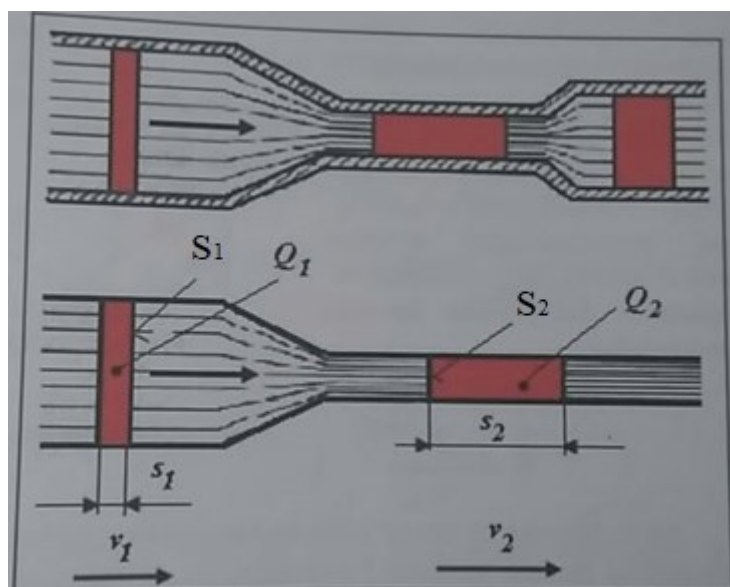
kde  $v$  je střední rychlost zvolená v průřezu.

Ze zákona zachování hmotnosti vyplývá, že objem, který proteče za daný čas  $t$  jakýmkoli průřezem  $S$ , je stejný.

$$Q_1 = Q_2$$

Z toho dále vyplývá, že při změně průřezu se změní i rychlost (obr. 3).

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (6)$$



Obr. 3 Znázornění rovnice kontinuity [9]

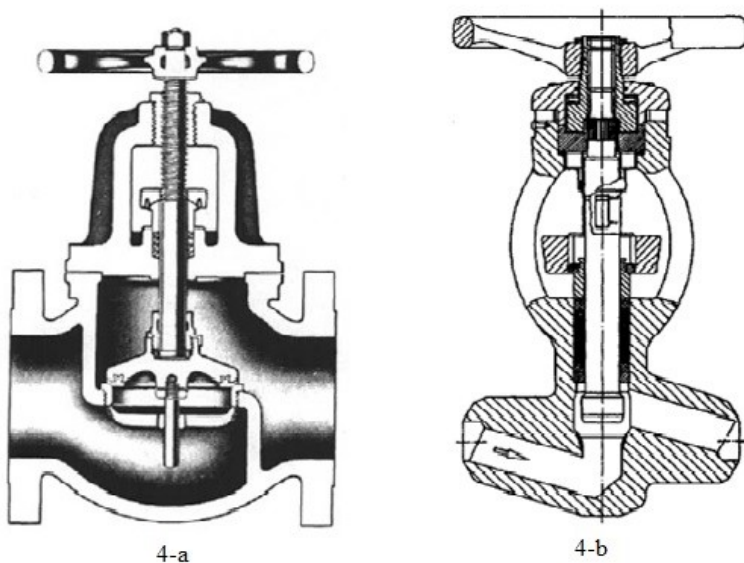
## 1.2 Uzavírací armatury

### Ventily

Výhodou uzavíracího ventilu je malý hydraulický odpor. Těleso ventilu je odlito ze šedé litiny a používá se až do tlaku PN 16 a teploty až 300 °C. Směr proudění je vždy pod kuželku a je naznačen šipkou na tělese. Ovládání ventilu je realizováno vyvozením síly potřebné k překonání síly vyvozené tlakem pracovní látky. Ovládání je do průměru 80 mm ruční, do 400 mm dvouruční a pro větší průměry čtyřruční. Ovládání může být také elektropohonem.

Na obr. 4-a je kulový ventil standardního typu s otáčecím ručním kolem a přišroubovanou talířovitou deskou. Přibližováním desky k sedlu ventilu se reguluje velikost průtočné plochy. Ventil je vybaven ucpávkou pro zamezení průsaků. Nevýhodou ventilu je, že při regulaci se mění celková výška ventilu, proto může být použit jen tam, kde je dostatek místa.

Na obr. 4-b je kulový ventil s integrovaným otáčecím kolem a kuželkou s kónickými dosedacími plochami. Výhodou ventilu je to, že při zvětšování průtočné plochy ventilu se nemění celková výška, tudíž jsou celkové požadavky na prostor menší.



Obr. 4 Řez kulovým ventilem [7]

## **Šoupátka**

Šoupátka mají nejmenší možný hydraulický odpor, proto se volí pro rozvody velkých světlostí z ekonomického hlediska.

### **Rozdělení šoupátek podle konstrukčních prvků**

#### **Šoupátka s nestoupajícím vřetenem**

Uvnitř klínu je neotáčivě uložena matice, která je například nákrůžkem opatřena proti axiálnímu posuvu. Výhodou je, že není potřeba nechat místo nad šoupátkem. Nevýhodou je to, že není zřejmé, je-li šoupátko otevřeno nebo uzavřeno.

#### **Šoupátko se stoupajícím vřetenem**

Provedení se stoupajícím vřetenem je prostorově náročnější, má větší hmotnost, ale využívá se pro nejvyšší parametry pracovní látky.[6]

## **Kohouty a kulové kohouty**

**Kohouty** jsou nejstarší používanou armaturou. Uzavíracím prvkem je obvykle komolý kužel, který má otvor pro průtok. Uzavírání a otevírání nastane otočením kužele o 90°.

**Kulový kohout** je moderní verzi kohoutu. Uzavírání zajišťuje přesně vyrobená koule s válcovým otvorem pro průtok, který má stejné rozměry jako vstup do kohoutu. Průtočný kanál má zanedbatelné hydraulické ztráty. Uzavření nebo otevření nastane po otočení koule o 90°.[6]

## **Regulační armatury**

Jedná se o armatury, které regulují nějakou veličinu týkající se průtoků. Reguluje se změnou průtokové plochy ventilu v závislosti na zdvihu. Nastavení zdvihu zajišťuje pohon. Armatury vhodné pro regulaci jsou například ventily.

### 1.3 Druhy proudění a bezrozměrná čísla

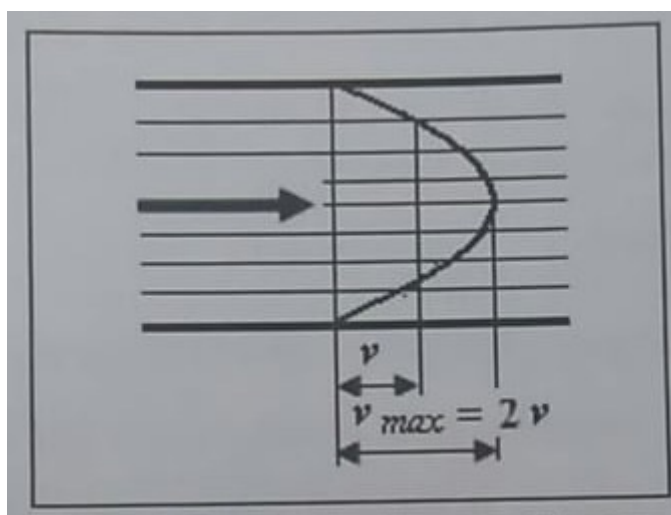
Kritérium pro určení druhu proudění je Reynoldsovo číslo ( $Re$ ) tedy pro přechod laminárního proudění do turbulentního proudění je směrodatné kritické Reynoldsovo číslo. Bezrozměrné podobnostní číslo  $Re$  definuje poměr mezi setrvačnou a viskózní silou.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (7)$$

Pokud je Reynoldsovo číslo větší než  $Re_{krit}$ , jedná se o turbulentní proudění. Pokud je Reynoldsovo číslo menší než  $Re_{krit}$ , jedná se o laminární proudění. Pro vodu je  $Re_{krit}=2320$ , ale existuje přechodová oblast.

#### Laminární proudění

Částice tekutiny se pohybují v rovné trubce po přímkách rovnoběžných s osou trubky. Rychlostní profil je parabolický, viz obr. 5. Ztráty v závislosti na  $Re$  se mění lineárně, viz obr. 7. Laminární proudění nastává při malých rychlostech.



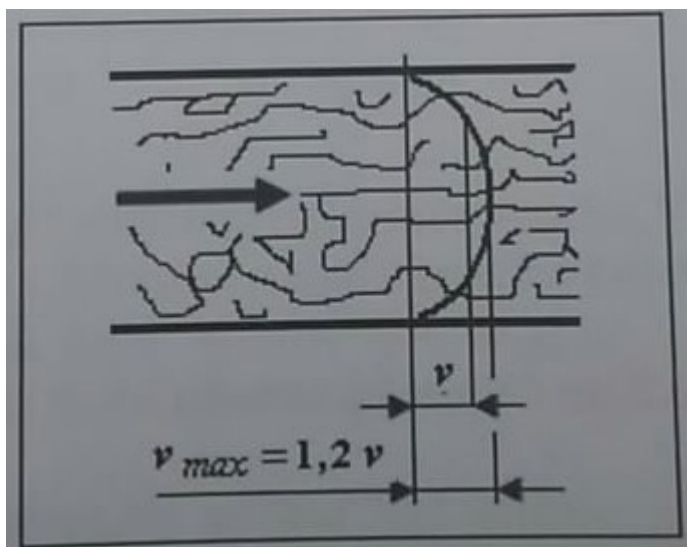
Obr. 5 Profil laminárního proudění [9]



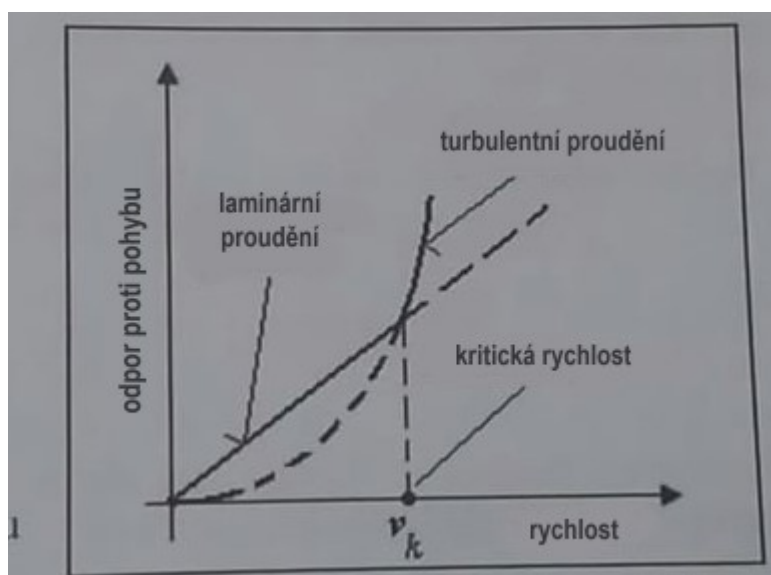
## Turbulentní proudění

Rychlost jednotlivých částic se v kapalině nepravidelně mění, ale lze určit průměrnou rychlost po průřezu. Rychlostní profil má obdélníkový tvar, viz obr. 6. Ztráty v závislosti na  $Re$  nebo na rychlosti se mění parabolicky, viz obr. 5.

U regulačních ventilů se uvádí mezní Reynoldsovo číslo  $Re_M = 4000$ . Vliv Reynoldsova čísla na chování proudění se projeví při malém průtoku regulačním ventilem s malým průtokovým součinitelem u vysokých viskozit a při malém tlakovém spádu. U většiny praktických aplikací se jedná o vyvinuté turbulentní proudění, což znamená, že ztrátový součinitel se už s velikostí  $Re$  nemění.



Obr. 6 Profil turbulentního proudění [9]



Obr. 7 Graf závislosti odporu proti pohybu na rychlosti [9]

## Kavitační číslo

Slouží pro popis kavitace z kvantitativního hlediska. Je to bezrozměrný parametr a určuje úroveň vývoje kavitace. Kavitační číslo je definováno v rovnici (8). Obecně platí, že pro vysoké hodnoty  $Ca$  proud nekavituje. Vyšší hodnoty naměřeného tlaku odpovídají vyšším hodnotám kavitačního čísla. Z toho vyplývá, že naměřený tlak bude zpravidla větší než tlak nasycených par.

$$Ca = \frac{2 \cdot (p_1 - p_w)}{p_1 - p_2} \quad (8)$$

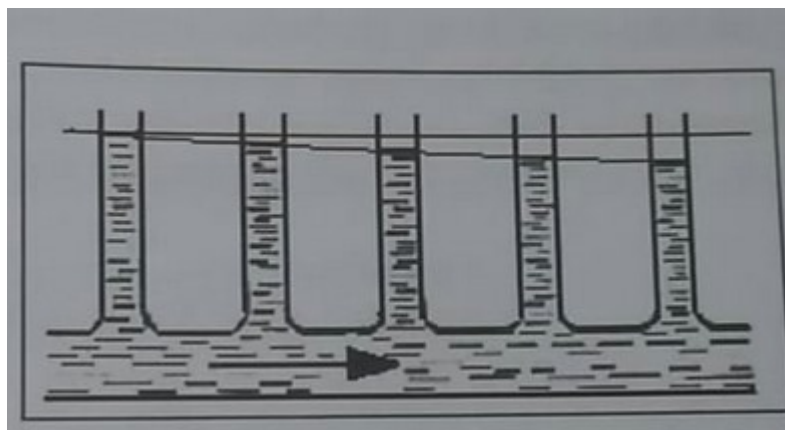
## 1.4 Ztráty – hydraulické odpory

Jsou to síly, které působí proti pohybu částic tekutiny a vznikají při proudění skutečných kapalin vlivem viskozity. Nejde o ztrátu přiváděné energie, ale o přeměnu energie na teplo.

Rozdělujeme je na:

Ztráty třením – vznikají třením částic kapaliny o stykovou plochu a třením částic mezi sebou. Třecí odpory závisí na délce potrubí a jsou znázorněné na obr. 8.

Místní ztráty – charakterizované ztrátovým součinitelem  $\xi$ , vznikají tam, kde se mění rychlost průtoku, nebo směr proudící kapaliny, nebo rychlost i směr. Jsou způsobené odbočkami, koleny, uzavíracími armaturami, měřicími zařízeními, filtry a podobně.



Obr. 8 Ztráta energie způsobené třením kapaliny [9]

Měrná ztrátová energie se určí:

$$e_z = Y_z = \frac{p_z}{\rho} = g \cdot \Delta h = \xi_c \frac{v^2}{2} \quad (9)$$

Hydraulické odpory se projevují při proudění skutečné tekutiny tak, že způsobují tlakový úbytek, snížení kinetické energie nebo úbytek polohové energie. Ztrátový součinitel celkový  $\xi_c$  se rovná třecí ztráty plus místní ztráty.

Ztráta se dá také vyjádřit jako ztrátová výška:

$$\Delta h = \xi_c \frac{v^2}{2g} \quad (10)$$

### **Tlaková ztráta**

Tlaková ztráta je přímo závislá na délce potrubí, rychlosti a součiniteli tření a nepřímo závislá na průměru potrubí.

$$\Delta p = \frac{\lambda}{d} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot l + \Sigma \xi \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (11)$$

### **Ekvivalentní délka**

Slouží pro nahrazení místních ztrát třecími ztrátami a je vyjádřena v délkových jednotkách

$$le = \frac{(\Sigma \xi \cdot d)}{\lambda} \quad (12)$$

Součinitel tření  $\lambda$  závisí na velikosti  $Re$  a relativní drsnosti stěny  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{k}{d} \quad (13)$$

Blásiův vztah pro hladké potrubí a turbulentní proudění, absolutní drsnost  $k = 0$  mm

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (Re_{krit} < Re < 8 \cdot 10^4) \quad (14)$$

Colebrook-Whiteův vztah pro drsné potrubí a turbulentní proudění,  $k \neq 0$  mm

$$\lambda = \frac{0,25}{\left[ \log \left( 0,27 \cdot \frac{k}{d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (15)$$

Pro laminární proudění:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

Pro výpočet ztrát se následně uplatní Bernoulliho rovnice.

## 2. Ztrátové součinitele pro ventily

Pro zadanou rychlost nebo průtok může být ztráta na ventilu předpověděna použitím rovnice kontinuity a průtokovými součiniteli. Existuje mnoho variací součinitelů jako Kv, Cv, Cf a Cd, které se liší v používání v různých zemích a v jednotkách.

Nejpoužívanějšími koeficienty jsou průtokový součinitel Kv nebo Cv.

Velikost součinitele je určena charakteristickým průtokem přes daný ventil za stanovených podmínek při 100 % zdvihu. Platí obecné pravidlo, čím větší koeficient, tím větší množství proteče soustavou nebo prvkem.

### Průtokový součinitel Cv

Součinitel Cv se obvykle používá pro řízení ventilu a je definován jako průtok vody při teplotě 60 °F v US galonech za minutu a poklesu tlaku o 1 psi. Využívá se v zemích, kde není zavedena soustava jednotek SI. Jeho jednotkou je [gallon·h<sup>-1</sup>]. Ekvivalentem pro tento součinitel je Kv. Tyto informace mohou být použity pro výpočet průtoku nebo pokles tlaku v systému pomocí následujících rovnic.

$$(v \text{ US základních jednotkách}) \quad Q = C_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (17)$$

$$(v \text{ jednotkách SI}) \quad Q = C_{VM} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (18)$$

$$C_{VM} = C_v \cdot 0,86 \quad (19)$$

(1 US galon=3,7854 litru, 1 psi = 6894,8 Pa, 1lb·ft<sup>3</sup>=16,018 kg·m<sup>-3</sup>)

### Průtokový součinitel Av

Určuje průtočné parametry a je méně používaný než Kv. Vychází z tlakové ztráty na daném prvku. Průtokový součinitel používaný v technické praxi:

$$A_v = Q \sqrt{\left(\frac{\rho}{\Delta p}\right)} \quad (20)$$

### Průtokový součinitel Kv

Součinitel vyjadřuje objemový průtok vody v [m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>], který proteče ventilem při daném zdvihu, tlakovém rozdílu před a za armaturou 1 bar a teplotě vody 15 °C. Používá se v zemích se zavedenou soustavou SI. Předpokládá se vyvinuté turbulentní proudění a dostatečný statický tlak, aby nemohlo dojít ke kavitaci.

$$K_v = \frac{1}{100} \cdot Q \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \quad (21)$$

Hodnota průtokového součinitele po dosazení hustoty  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$  a dosazení  $\Delta p$  v barech:

$$K_v = \frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} \quad (22)$$

Součinitel zůstává relativně konstantní pro velkou škálu typů ventilů a těsnění i pro velký rozsah průměrů potrubí. Hodnota koeficientu  $K$  pro potrubí a ventily v sérii může být přímo sčítána pro nalezení velikosti odporu celého systému. Na obr. 9 jsou uvedeny vztahy mezi jednotlivými koeficienty.

$K_v = 8,65 \cdot 10^{-1} \cdot C_v$	$C_v = 1,16 \cdot K_v$
$A_v = 2,78 \cdot 10^{-5} \cdot K_v$	$K_v = 3,6 \cdot 10^4 \cdot A_v$
$C_v = 4,17 \cdot 10^4 \cdot A_v$	$A_v = 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot C_v$

*Obr. 9 Tabulka pro vzájemné převody průtokových součinitelů [7]*

## Vlastní charakteristika ventilu

Průtoková charakteristika regulačního ventilu je procento maximálního průtoku ventilem zakresleno proti cestovní poloze. V případě čtvrtotáčkových ventilů může být poloha pojezdu buď procento zdvihu, nebo úhlu otevření.

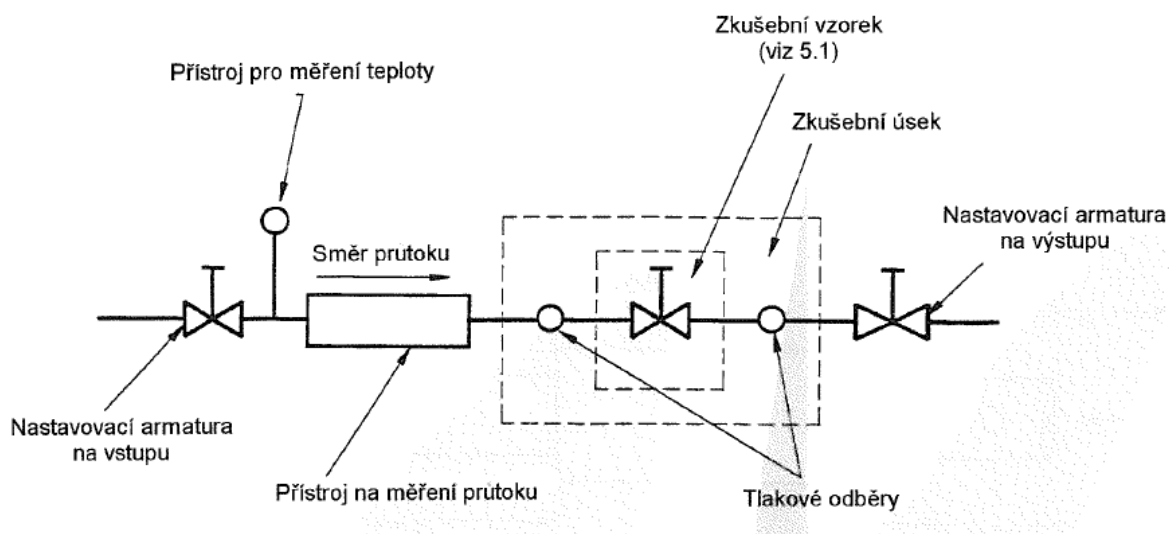
## 2.1 Kavitace ventilu

Pokud se pro škrcení průtoku používá čtvrtotáčkový ventil, měly by se vyhodnotit pracovní podmínky, aby se předešlo kavitaci. Kavitace může snížit životnost ventilu i potrubí a může způsobit nežádoucí hluk a vibrace.

Kavitace je způsobená odpařováním a následnou prudkou kondenzací tekutiny. Dochází k ní v oblastech nízkého tlaku v potrubním systému. Tyto oblasti jsou následkem částečně otevřeného ventilu, kde dochází k náhlé změně rychlosti proudění a rychlému oddělení sloupce kapaliny. Když tlak v této zóně klesne pod tlak nasycených par, kapalina se začne odpařovat a tvoří bublinky páry. Jak jsou bublinky unášeny proudící kapalinou, tlak se v potrubí vyrovná a bublinky prudce implodují. Pokud se energie těchto bublin uvolní blízko hran ventilu, dochází k ohýbání stěn a vytrhávání materiálu ventilu. Experimentální měření ukázala, že bubliny dokážou vyvolat tlak až 689 MPa a hluk až 100 dB. [8]

### 3. Zkušební systém

Uspořádání zkušebního systému je dáno normou ČSN EN 60534-2-3, a je popsán na obr. 10.



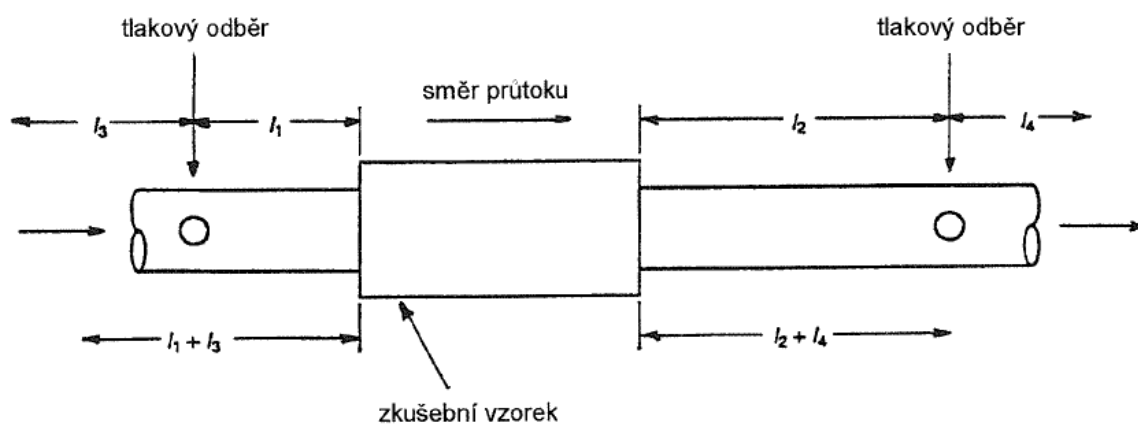
Obr. 10 Základní schéma uspořádání průtokového systému [4]

#### Zkušební vzorek

Je to jakákoli kombinace armatur s difuzory, konfuzory, nebo samotná armatura, pro kterou se požaduje výsledek zkoušky.

#### Zkušební úsek

Zkušební úsek je složen ze dvou přímých trubek, kde na vstupu i výstupu musí být dodržena světlost odpovídající světlosti připojeného zkušební vzorku. Vnitřní průměr trubky musí být v rozmezí  $\pm 2\%$  vnitřního průměru zkoušeného vzorku pro jmenovitou světlost do DN 250 a jmenovitého tlaku PN 100. Vnitřní povrch trubky musí být čistý, bez čehokoli, co by mohlo způsobit narušení prů toku. Délky před a za zkušebním vzorkem jsou dány na obr. 11 a konkrétní hodnoty jsou dány tabulkou na obr. 12.



Obr. 11 Standardní uspořádání zkušební úseku [4]

$l_1$	2x jmenovitá světlost trubky
$l_2$	6x jmenovitá světlost trubky
$l_3$	18x jmenovitá světlost trubky minimální
$l_4$	1x jmenovitá světlost trubky minimální

Obr. 12 Tabulka vzdáleností

### Nastavovací armatury

Nastavovací armatura na vstupu se využívá pro nastavení vstupního tlaku do zkušebního úseku. Armatura nesmí ovlivnit přesnost měření. Nastavovací armatura na výstupu se používá pro nastavení během zkoušky a jmenovitá světlost může být větší než světlost zkušebního vzorku. Obě armatury dohromady se používají pro nastavení tlakového spádu. Při použití tekutiny musí být zabráněno odpařování v armatuře na vstupu.

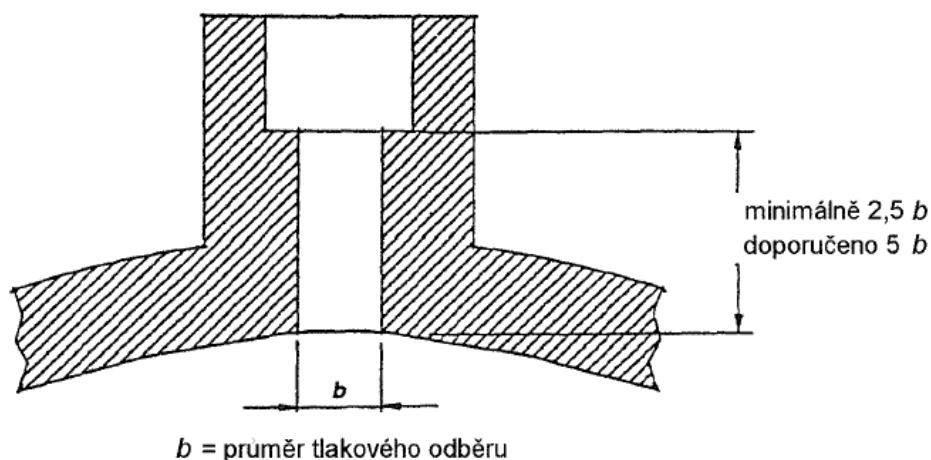
### Měření průtoku

Na zařízení pro měření průtoku jsou kladeny podmínky přesnosti, které se musí pohybovat s mezní úchylkou  $\pm 2\%$  od skutečné hodnoty. Tohoto je docilováno cejchováním zařízení, které se provádí tak často, aby tato přesnost byla zachována. Zařízením se stanovuje okamžitý střední průtok.

### Tlakové odběry

Tlakové odběry musí být umístěny v souladu s obrázkem „Standardní uspořádání zkušebního úseku“ a tabulkou. Průměr tlakového odběru  $b$  musí být nejméně 3 mm a maximálně 12 mm nebo  $1/10$  DN. Průměry na vstupu a na výstupu musí být stejné.

Otvor odběru musí být kruhový dle obr. 13. Vstupní hrana musí být zbavena otřepů a všech nepravidelností. Vstupní hrana tlakového odběru musí být čistá a ostrá.



Obr. 13 Doporučené připojení tlakového odběru [4]

Velikost trubky	Nepřesahující	Větší než
Menší než 50 mm	6 mm	3 mm

Obr. 1 Tabulka velikostí vrtaného otvoru pro tlakové odběry [4]

## Měření tlaku

Měření tlaku a tlakových diferencí musí být provedeno kalibrovaným měřícím zařízením, které se kalibruje tak často, jak je potřeba k dodržení přesnosti  $\pm 2\%$  naměřené hodnoty.

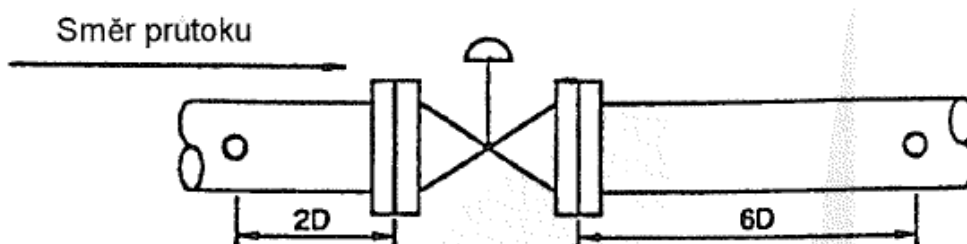
## Montáž zkušebního vzorku

Pro montáž zkušebního vzorku je předepsaná dovolená nesouosost mezi osou potrubí a osou vstupního a výstupního hrdla zkoušeného vzorku pro různé jmenovité světlosti. Přesnosti jsou dány tabulkou na obr. 15.

Jmenovitá světlost trubky	Dovolená nesouosost
DN 15 až DN 25	0,8 mm
DN 32 až DN 150	1,6 mm
DN 200 a větší	0,01 jmenovité světlosti trubky

Obr. 2 Tabulka dovolené nesouososti

Těsnění musí mít správnou velikost a nesmí zasahovat dovnitř trubky.



Obr. 3 Příklad typického umístění tlakových odběrů pro regulační armaturu [4]

Výpočet délek na obr 17 je dle obr 11 pro předpokládané průměry

	DN 20	DN 25	DN 32	DN 40
$l_1$ [mm]	40	50	64	80
$l_2$ [mm]	120	150	192	240
$l_3$ [mm]	360	450	576	720
$l_4$ [mm]	20	25	32	40
b [mm]	3-6	3-6	3-6	3-6
Nesouosost [mm]	0,8	0,8	1,6	1,6

Obr. 17 Tabulka konkrétních hodnot pro měření

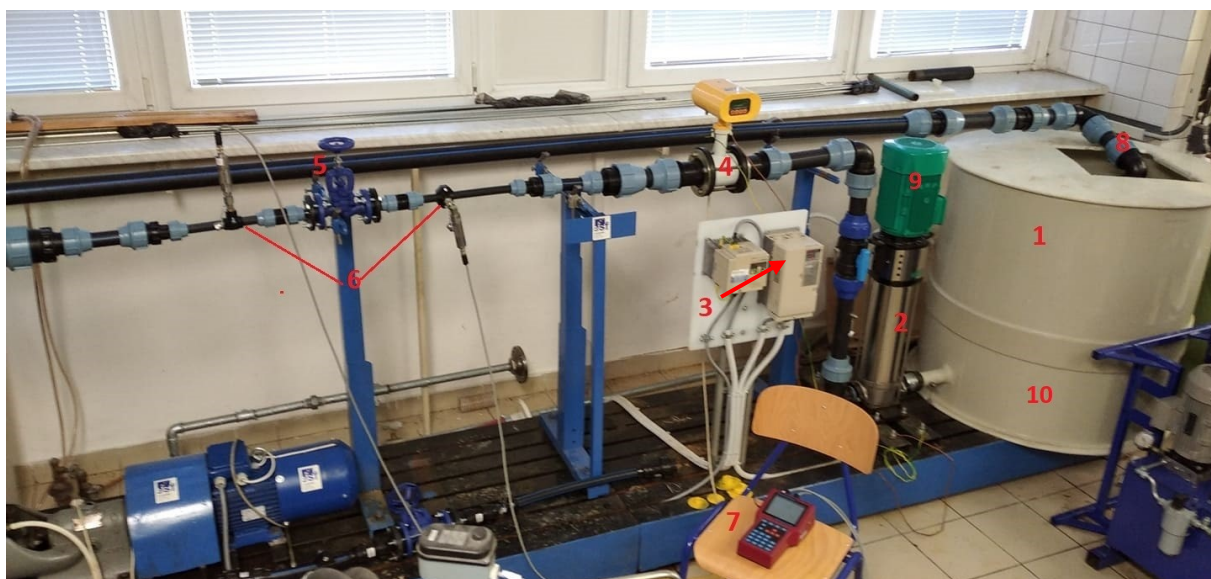


### 3.1 Praktická část

V praktické části se zabývám detailním návodem pro sestavení měřicí trati. Správným umístěním zkušebního vzorku a tlakových odběrů. Důraz se klade na dodržení vzdáleností pro ustalovací kusy před a za měřeným vzorkem. Následně bylo provedeno samotné měření, ze kterého jsem určil charakteristiky ventilu DN 25, DN 32 a DN 40 pro čtyři různé zdvihy definované společností Armatury group a. s. Vyhodnoceny byly ztrátový součinitel, průtokový součinitel, tlaková ztráta, Reynoldsovo číslo a kavitační číslo.

### 3.2 Popis měřícího obvodu:

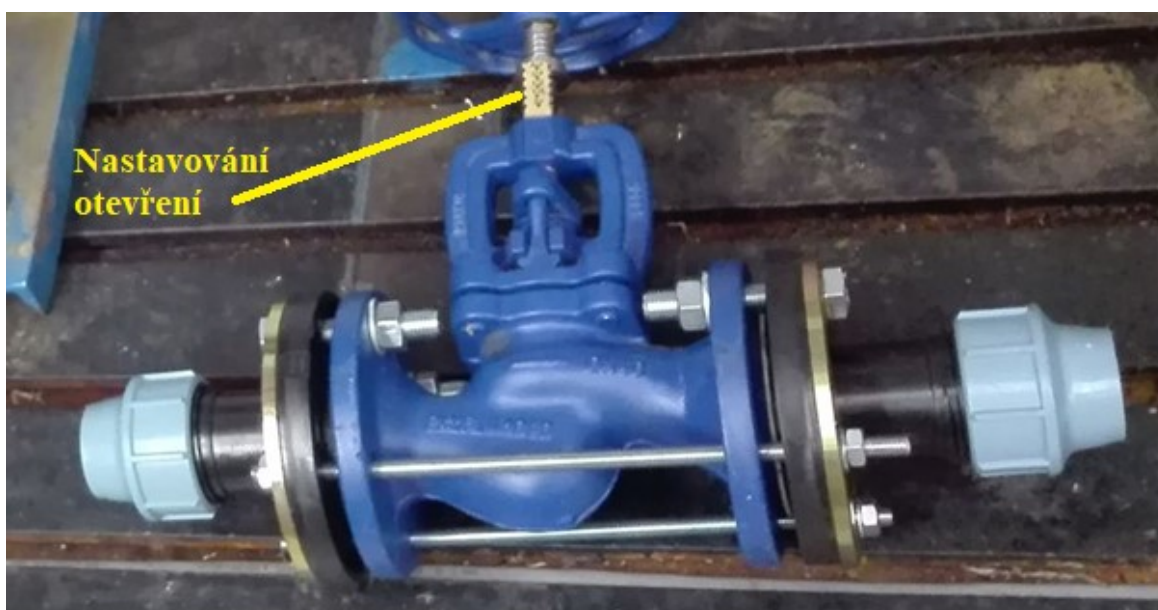
Měřicí obvod je sestaven podle normy [4], kde nutností bylo dodržet vzdálenosti před a za měřeným objektem kvůli ustálení proudění. Voda je nasávána čerpadlem (2) z nádrže (1) a přes průtokoměr (4) je vedena do ustalovacího kusu před měřeným ventilem (5). Snímače tlaku (6) jsou umístěny před a za ventilem podle normy [4], viz obr. 15 a obr. 18. Frekvenčním měničem (3) se nastavují otáčky čerpadla. Oba měřené tlaky se odečítají na vyhodnocovacím zařízení (7) a průtok se odečítá na průtokoměru (4). Zpětné potrubí (8) končilo dostatečně nízko pod hladinou, aby se minimalizovalo množství vzduchu, který do vody vniká. Uvnitř nádoby bylo umístěno měřidlo teploty a kyslíku (10), které vyhodnocovalo množství rozpuštěného kyslíku ve vodě a teplotu, která byla po celou dobu měření konstantní. Zdvih ventilu se nastavuje otáčením kola a poloha se určuje podle rysky. Otočením do správné polohy se dá nastavit plné otevření ventilu,  $\frac{3}{4}$  otevření,  $\frac{1}{2}$  otevření a  $\frac{1}{4}$  otevření.



Obr. 48 Měřicí obvod

Č.	Název prvku	Označení	Výrobce
1.	Nádrž	50000014785	VŠB-TUO
2.	Odstředivé čerpadlo	Helix V1605	WILO
3.	Frekvenční měnič	V1000 1/8 25HP	YASKAWA
4.	Průtokoměr	FN2014PFEDN50	ELIS PLZEŇ
5.	Regulační ventil		
6.	Snímače tlaku	3403-32-S-71.33A	HYDROTECHNIK
7.	Vyhodnocovací zařízení	M5050	HYDROTECHNIK
8.	Potrubí		
9.	Elektromotor	Q2E FC 112M2C	TEE
10.	Měřidlo teploty a kyslíku	COM 223/253	ENDRESS+HAUSER

*Obr. 19 Specifikace prvků ve zkušebním obvodu*



*Obr. 20 Příklad připraveného ventilu k uchycení do obvodu*

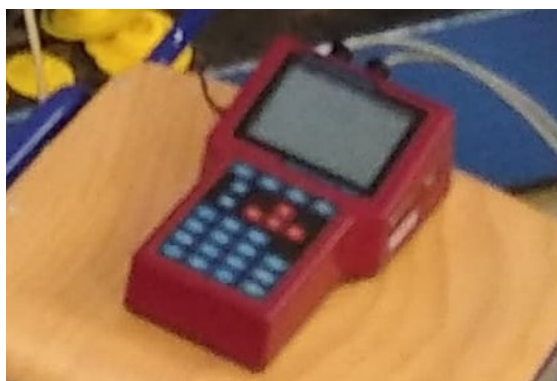
### 3.3 Prvky obvodu



Obr. 21 Indukční průtokoměr

Průtokoměr	Pozice č.4
Výrobce	Elis Plzeň a. s.
Typ	Indukční průtokoměr FLONET FN20XX.1
Jmenovitý průtok	Min/max = 0,72/72 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>
Přesnost	+ - 0,2 % pro 10–100 % Q <sub>max</sub> + - 0,5 % pro 5–100 % Q <sub>max</sub>

Obr. 5 Tabulka parametrů pro průtokoměr



Obr. 6 Vyhodnocovací zařízení HYDROTECHNIK M5050

Vyhodnocovací zařízení HYDROTECHNIK M5050	Pozice č. 7
Výrobce	Hydrotechnik
Převodník	Multisystem 5050
Tlakové snímače HySense® PR 300	Pozice č. 6
Signál/odezva	4 až 20 mA / 1 ms
Přesnost	+ - 3 % pro -20 ...80 °C
Rozsah	-1–6 bar

*Obr. 24 Tabulka parametrů pro vyhodnocovací zařízení HYDROTECHNIK M5050 a tlakové snímače*



*Obr. 25 Odstředivé čerpadlo*

Čerpadlo	Pozice č. 2
Výrobce	Wilo
Typ	Helix V1605
Jmenovitý průtok	16 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>
Kmitočet	50/60 Hz

*Obr. 267 Tabulka parametrů pro odstředivé čerpadlo*

### 3.4 Průběh měření

Prvním krokem je vyčištění nádrže a napuštění čistou vodou. Po dosažení dostatečné výšky vody je nádrž připravena. Dalším krokem je přišroubování zkušební vzorku (dále jen ZV) k přírubám a jejich následné uchycení do obvodu. Pro jednotlivé průměry jsou hodnoty vzdáleností snímačů před a za ventilem uvedeny na obr. 18. Po navrtání potrubí před a za ZV a připevnění měřících přípojek, minimezek, jsem vynuloval tlakové senzory  $p_1$  a  $p_2$  a připevnil je k obvodu pro měření relativního tlaku. Při prvním měření jsem ventil nastavoval na plné otevření.

Před každým měřením následovalo změření teploty vody a množství kyslíku ve vodě. Před prvním spuštěním jsem odvzdušnil celý obvod a zalil jsem lopatky čerpadla. Po zapnutí čerpadla a nastavení frekvence pomocí frekvenčního měniče na minimální měřenou hodnotu 6 Hz jsem počkal na ustálení průtoku a odečítal jsem hodnoty tlaků před i za ventilem a souběžně hodnoty průtoku. Měření jsem opakoval až do maximálního průtoku, který se lišil u každého měření. Maximální průtok pro mě byl při slyšitelném vývoji kavitace. Při plném otevření výpočty ukázaly, že se o kavitaci nejspíš nejednalo, což znamená, že jsem se mohl dostat do oblasti stejné frekvence čerpadla a kuželky ventilu, a to byl zvuk, který jsem slyšel. Pro bližší informace o kavitaci by bylo potřeba změřit vše ještě jednou, ale přidat snímače měření vibrací a hluku ventilu, potrubí i čerpadla. Při měření jsem nastavoval pro každý ventil čtyři polohy zdvihu.

Následně při výměnách zkušebních vzorků jsem uzavíral kulový ventil za čerpadlem, tím zůstaly lopatky čerpadla zalité a minimalizoval se přístup vzduchu do trati. Po změření všech čtyř zdvihů jsem přeshrouboval průměry potrubí a příruby podle nového průměru ventilu. Při každém měření byla kontrolována hladina kyslíku ve vodě a její teplota, obě tyto hodnoty byly konstantní. Teplota byla 23,2 °C a množství kyslíku bylo 7,52 mg·l<sup>-1</sup>, což pro danou teplotu odpovídá objemovému zlomku vzduchu 1,56 %.

Na obr. 27 jsou vyznačeny naměřené a některé vypočtené hodnoty pro DN 25, další hodnoty jsou uvedené v příloze č. 1.

$f$	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$Q$	$\xi$	$K_v$	$Re$	$Ca$	kavitace
[Hz]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	[-]	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	[-]	[-]	
6	105325	92825	12500	0,0003	17,75	3,80	23 767	16,38	
8	115325	92925	22400	0,0005	14,83	4,16	34 802	10,03	
10	127325	92825	34500	0,0006	14,48	4,21	43 715	7,21	
12	142325	92325	50000	0,0008	14,60	4,19	52 415	5,57	
14	159325	92025	67300	0,0009	14,01	4,28	62 070	4,65	
16	179325	91525	87800	0,0011	13,97	4,28	70 983	4,02	
18	201325	90825	110500	0,0012	13,85	4,30	80 002	3,59	
20	227325	90125	137200	0,0013	13,92	4,29	88 915	3,27	ano
22	255325	89225	166100	0,0015	13,83	4,31	98 146	3,04	ano

*Obr. 87 Naměřené a vypočtené hodnoty pro plné otevření ventilu DN 25*

## Příklad vypočtených hodnot prvního řádku tabulky pro plné otevření ventilu DN 25

Použité základní fyzikální vlastnosti vody:

$$\rho = 997,54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$p_w = 2963 \text{ Pa}$$

$$d = 0,02 \text{ m}$$

Změna tlaku  $\Delta p$  se vypočítá:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 105325 - 92825 = 12500 \text{ Pa} \quad (23)$$

Výpočet rychlosti:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{0,0003733}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = 1,19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (24)$$

Následně se vypočítá ztrátový součinitel:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 12500}{997,54 \cdot 1,19^2} = 17,75 \quad (25)$$

Poté vypočítám  $K_v$  jako:

$$K_v = \frac{Q \cdot 3600}{\sqrt{\frac{\Delta p}{10000}}} = \frac{0,0003733 \cdot 3600}{\sqrt{\frac{12500}{100000}}} = 3,80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (26)$$

Výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{1,19 \cdot 0,02}{0,000001} = 23\,767 \quad (27)$$

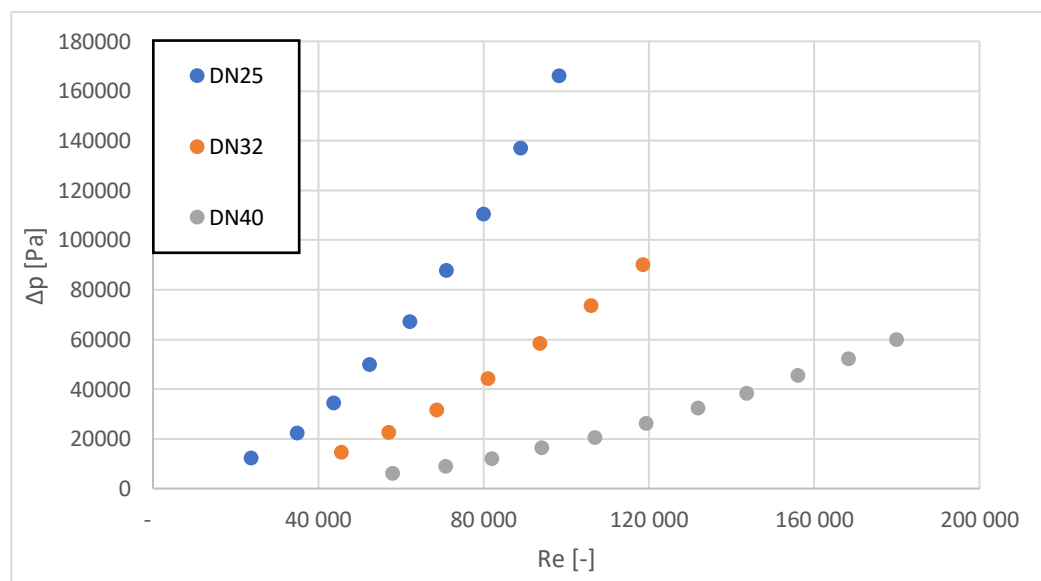
Kavitační číslo:

$$Ca = 2 \cdot \frac{p_1 - p_w}{\Delta p} = 2 \cdot \frac{105325 - 2963}{12500} = 16,38 \quad (28)$$

## 4. Metodika vyhodnocení

Vyhodnocení se zabývá ventilem o průměru DN 25.

V grafu závislosti Reynoldsova čísla na tlakové ztrátě pro plné otevření ventilu lze vidět, že tlaková ztráta klesá s rostoucí světlostí. Pro DN 40 je ztráta několikanásobně menší než pro DN 25 nebo DN 32. Hodnoty Reynoldsova čísla přesahují kritickou hranici  $Re_{Krit.} = 2320$ , proto se jedná o turbulentní proudění.

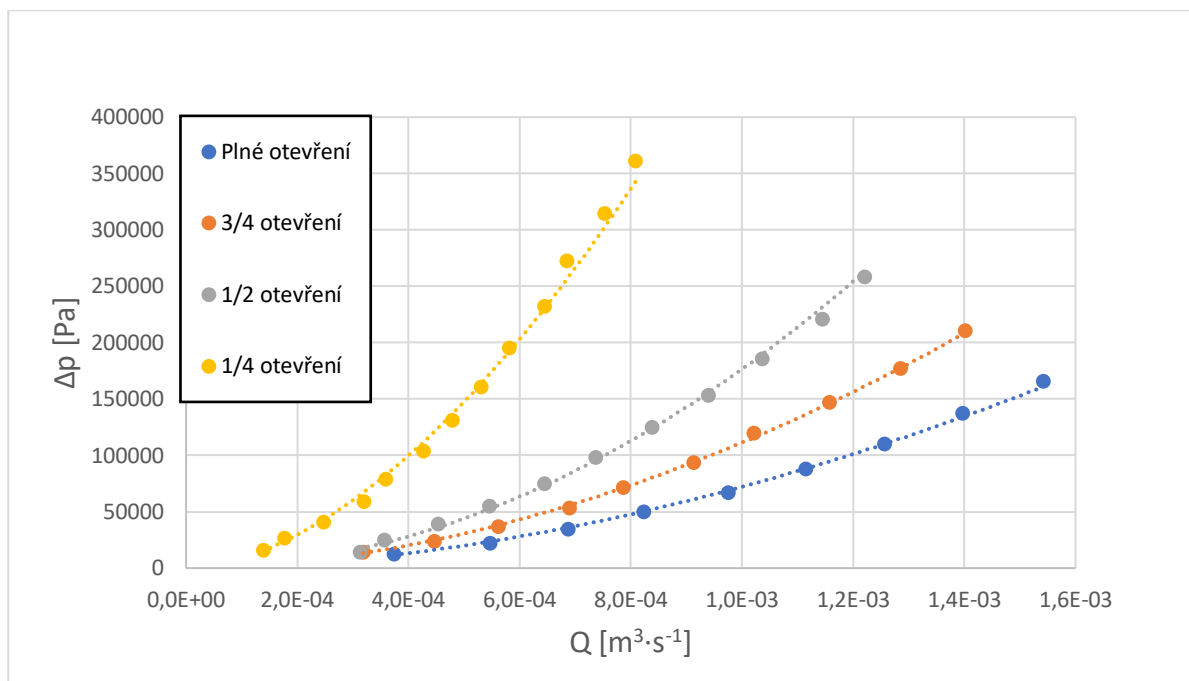


Obr. 98 Porovnání tlakových ztrát při plném otevření v závislosti na Reynoldsově čísle

Z grafu závislosti tlakového spádu na průtoku lze vyčíst, že pro ventil DN 25 tlakové ztráty rostou s postupným zmenšováním průřezu, tedy uzavírání ventilu. Pro plné otevření jsou tlakové ztráty trojnásobně menší než pro  $\frac{1}{4}$  otevření ventilu. Tlaková ztráta  $\Delta p$  je zde kvadraticky závislá na průtoku podle rovnice (29), což platí pouze pro turbulentní proudění, o které se v tomto měření jedná, protože Reynoldsovo číslo se pohybuje nad hranici  $Re_{Krit.}$ ,  $Re_{Krit.} = 2320$ .

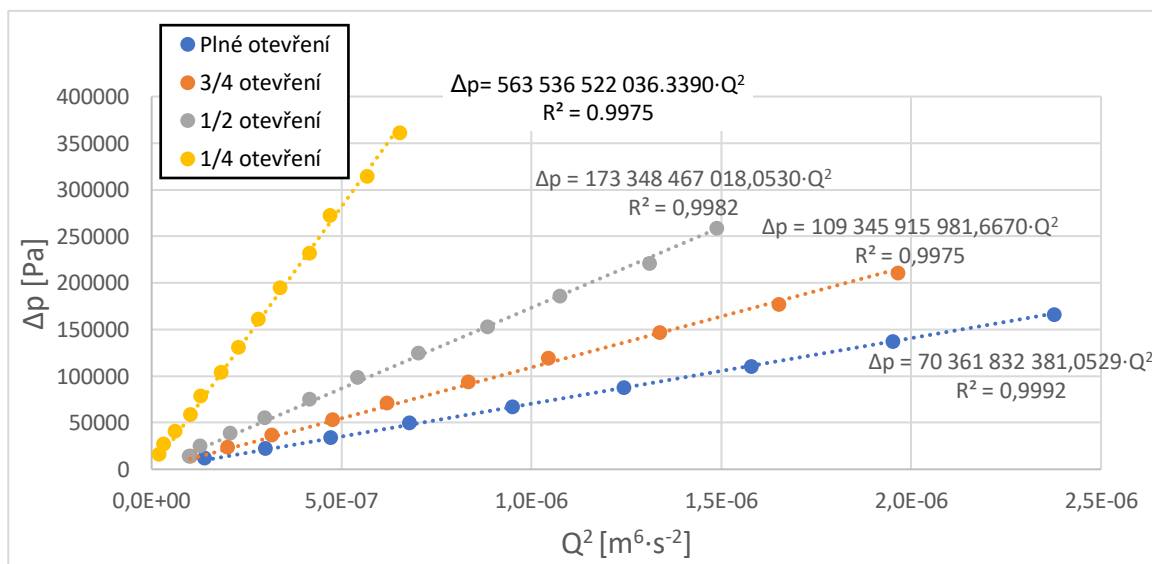
$$\Delta p = R \cdot Q_v^2 \quad (29)$$





Obr. 29 Závislosti tlakové ztráty na průtoku ventilem DN 25

Pro určení odporového součinitele  $R$  je potřeba graf závislosti  $\Delta p$  na  $Q_v^2$ . Rovnice v grafu vycházejí z rovnice 29. Tlaková ztráta je nejmenší pro plné otevření a největší pro  $\frac{1}{4}$  otevření.



Obr. 30 Závislosti tlakové ztráty na  $Q^2$  pro ventil DN 25

Z obr. 29 jsem vyhodnotil odporový součinitel R a vypsál pro jednotlivá otevření do obr. 30

	R	$\xi$	$\mu$
	[kg.m-7]	[-]	[-]
plné otevření	7.04E+10	13.92	0.268019
3/4 otevření	1.09E+11	21.64	0.21498
1/2 otevření	1.73E+11	34.30	0.170742
1/4 otevření	5.64E+11	111.51	0.094698

Obr. 31 Tabulka součinitelů

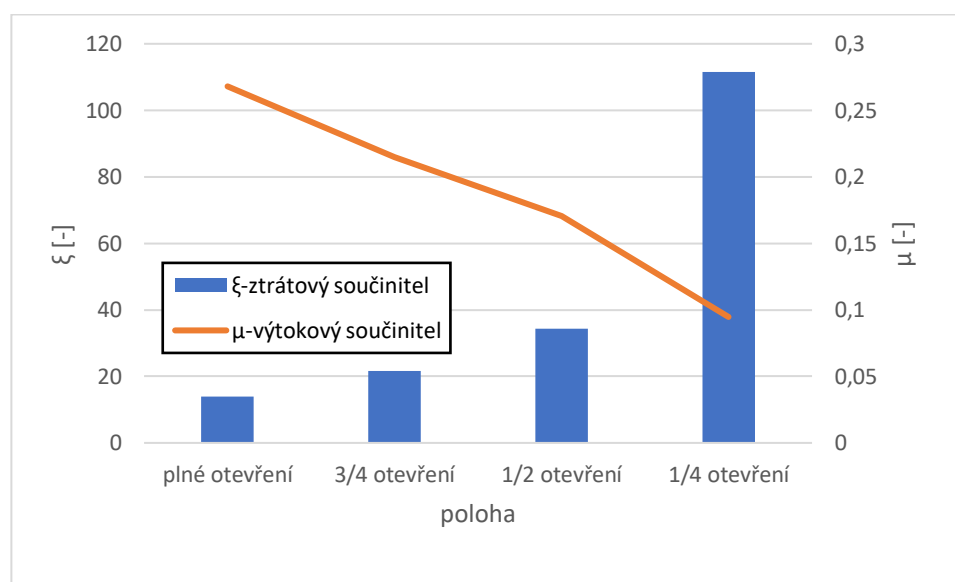
Příklady výpočtu pro ztrátový součinitel pro první řádek:

$$\xi = \frac{R \cdot 2 \cdot S^2}{\rho} = \frac{7,04 \cdot 10^{10} \cdot 2 \cdot 0,000314^2}{997,54} = 13,92 \quad (30)$$

Příklady výpočtu pro výtokový součinitel pro první řádek:

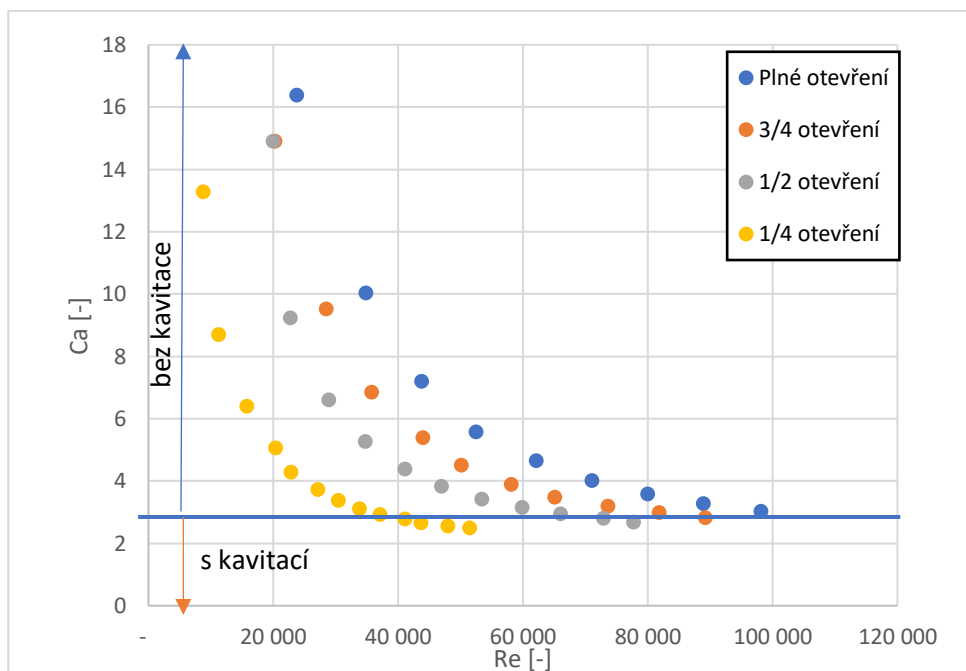
$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi}} = 0,268019 \quad (31)$$

Na grafu závislosti ztrátového součinitele lze vidět, že se zmenšující se plochou průtoku roste ztrátový součinitel, a naopak klesá hodnota výtokového součinitele.



Obr. 32 Závislost ztrátového součinitele a výtokového součinitele na poloze pro DN 25

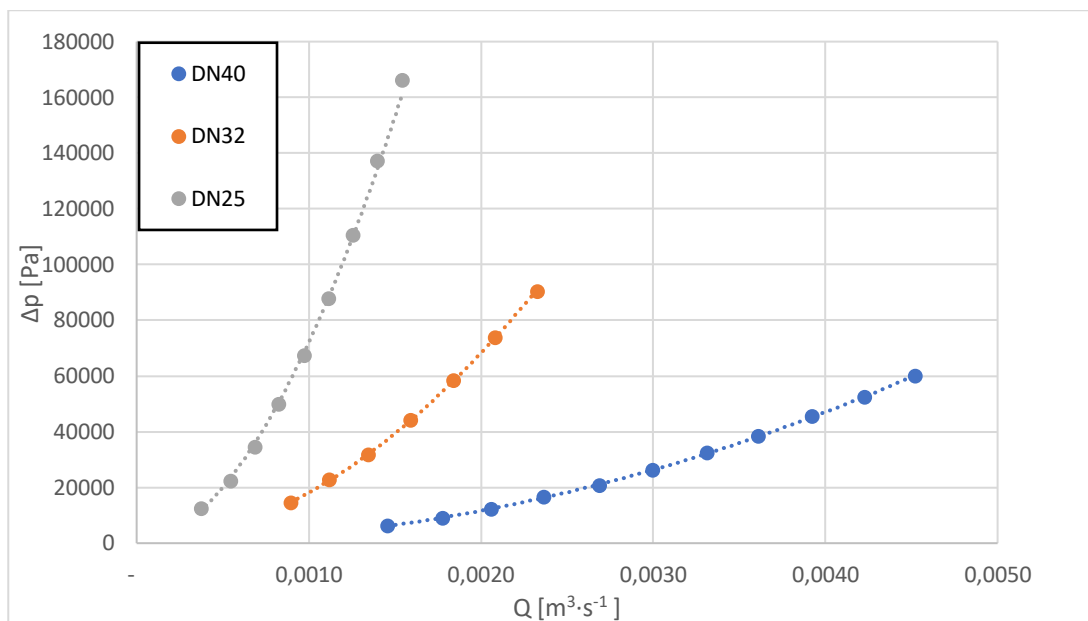
Na obr. 33 je znázorněna závislost kavitačního čísla  $Ca$  v závislosti na Reynoldsově čísle  $Re$ . V tomto měření byl určen kritický kavitační součinitel ventilu jako 3,12. V grafu je znázorněn modrou čarou. Pro Reynoldsova čísla větší než 40 000 byla prvně pozorována kavitace při nejmenším zdvihu kuželky. Pro větší zdvihy se kavitace objevovala později, a to kolem  $Re = 70\,000$ . Kavitace se projevuje zvýšenou měrou hlučnosti ventilu, kterým protékala kapalina v turbulentním režimu.



Obr. 10 Závislost Reynoldsova čísla na kavitačním čísle  $Ca$

## 4.1 Porovnání ventilů pro jejich plné otevření

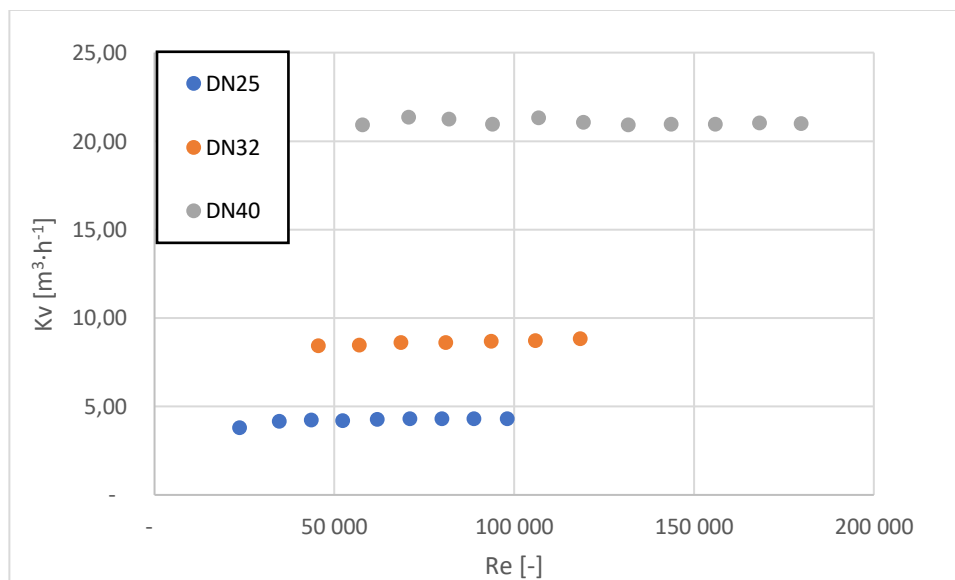
Nejvyšší tlakové ztráty jsou u ventilu DN 25, což souhlasí s teorií, která říká, že tlaková ztráta je nepřímo závislá na průměru a přímo závislá na rychlosti (16). Ve ventilu DN 25 jsou obecně vyšší rychlosti při stejné frekvenci než ve ventilu DN 32 nebo DN 40, viz přílohy. Tato hodnota je podle vzorce (16) ještě umocněna. Vnitřní průměr je u DN 25 menší než u DN 32 nebo DN 40. V praxi to znamená, že křivka pro tlakovou ztrátu ventilu DN 25 je parabolická a roste nejstrměji a pro ventil DN 40 nejpomaleji, což odpovídá měření viz obr 34.



Obr. 34 Porovnání tlakové ztráty v závislosti na průtoku pro plné otevření všech měřených vzorků

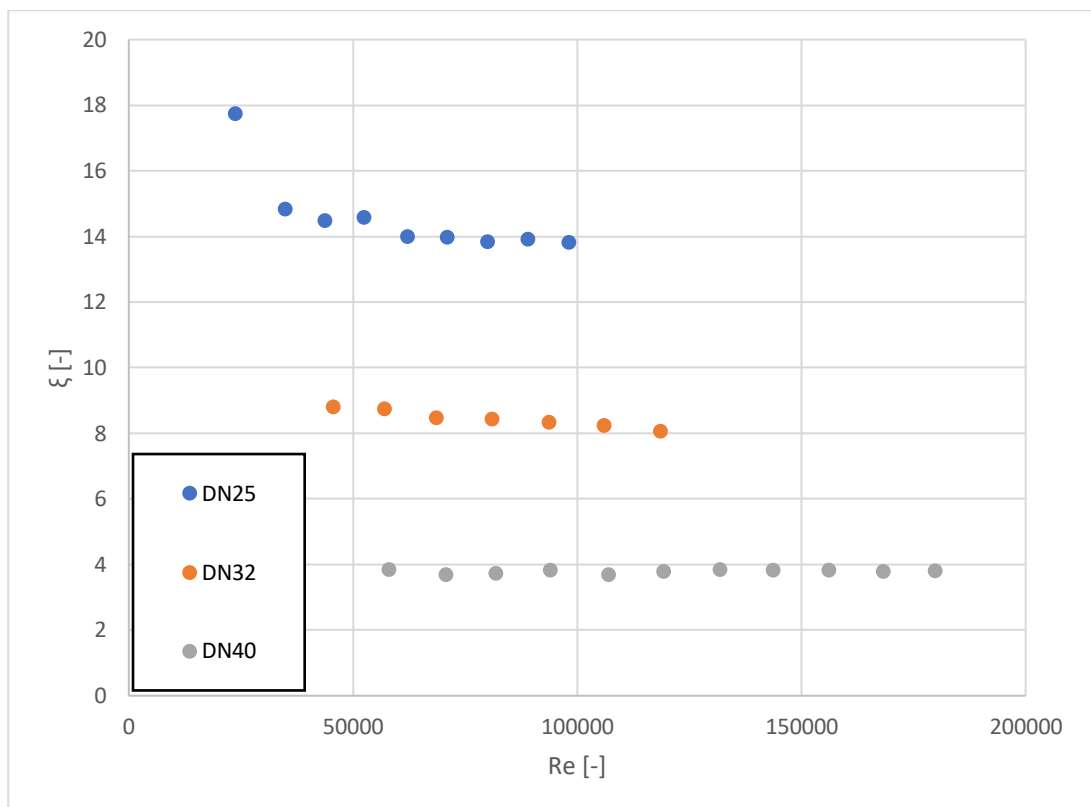
## 4.2 Vyhodnocení součinitelů

Součinitel  $K_v$ , který je vyhodnocený níže na obr. 35, je konstantní pro všechny světlosti ventilů a svou hodnotu nemění ani při zvyšujících se Reynoldsových číslech.



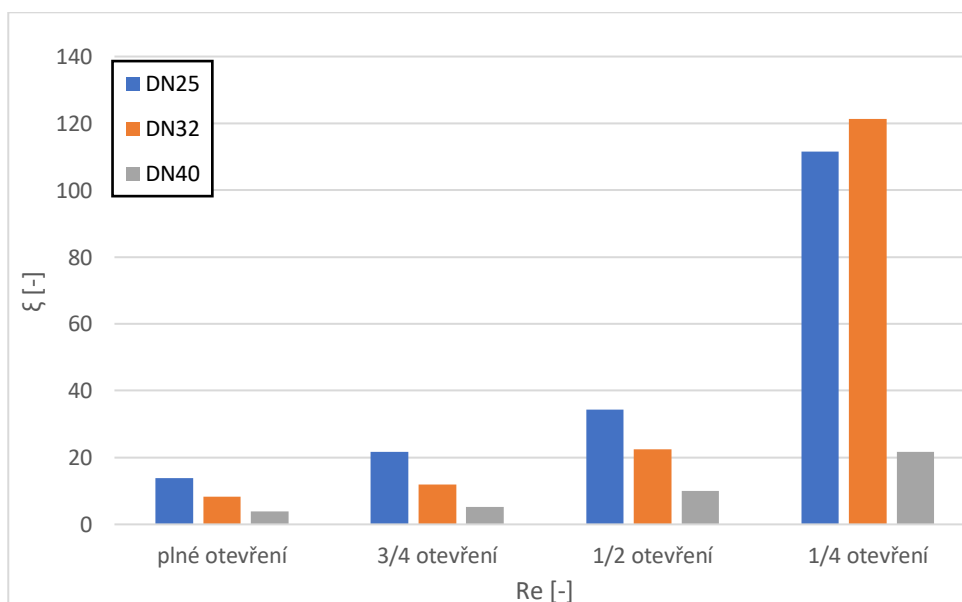
Obr. 35 Závislost průtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro DN 25

Závislost Reynoldsova čísla na ztrátě ukazuje, že pro vysoké hodnoty  $Re$  je ztráta konstantní. Pro ventil DN 25 je vidět sestupnou tendenci, která se ale s rostoucím  $Re$  ustálí.



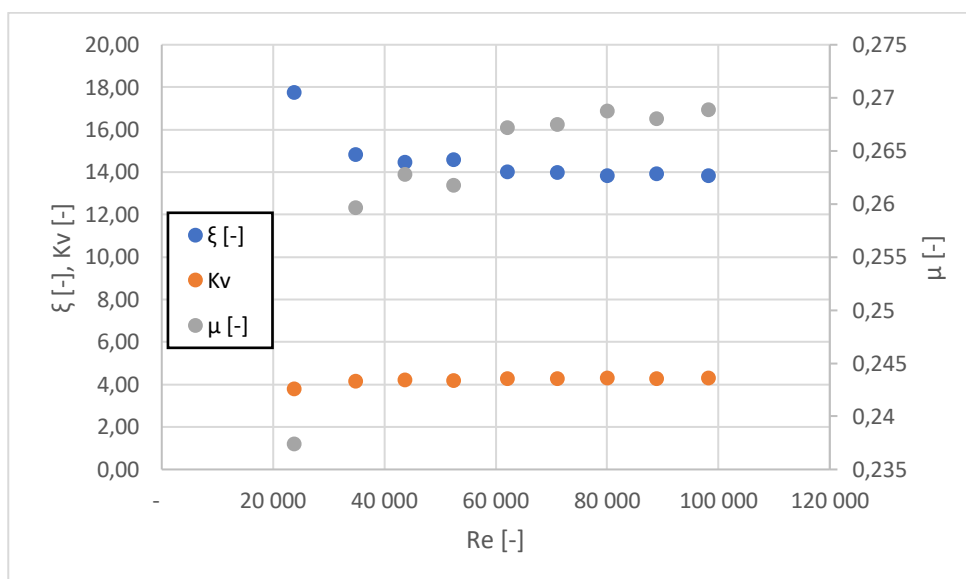
Obr. 11 Závislost ztráty na Reynoldsově čísle

Na obr. 37 je vidět, že ztrátový součinitel má vždy trend klesající s rostoucí světlostí ventilu. Není tomu tak ale u  $\frac{1}{4}$  otevření pro ventil DN 32, kde je ztrátový součinitel vyšší než u DN 25 (obr 37) chyba je pravděpodobně způsobena nepřesným nastavením otevření ventilu. Pro kontrolu by bylo vhodné měření opakovat ještě jednou.



Obr. 37 Porovnání velikostí ztrátových součinitelů v závislosti na Reynoldsově čísle.

Na obr. 38 jsou znázorněny jednotlivé součinitele pro ventily DN 25 pro plné otevření. Z obr. 38 je patrné, že s rostoucím  $Re$  roste výtokový součinitel  $\mu$ , ale naopak klesá ztrátový součinitel  $\xi$ . Průtokový součinitel  $K_v$  je v měřeném rozsahu  $Re$  konstantní. Pro vyšší  $Re$  se všechny součinitele ustálí a při plně rozvinutém turbulentním proudění budou konstantní.

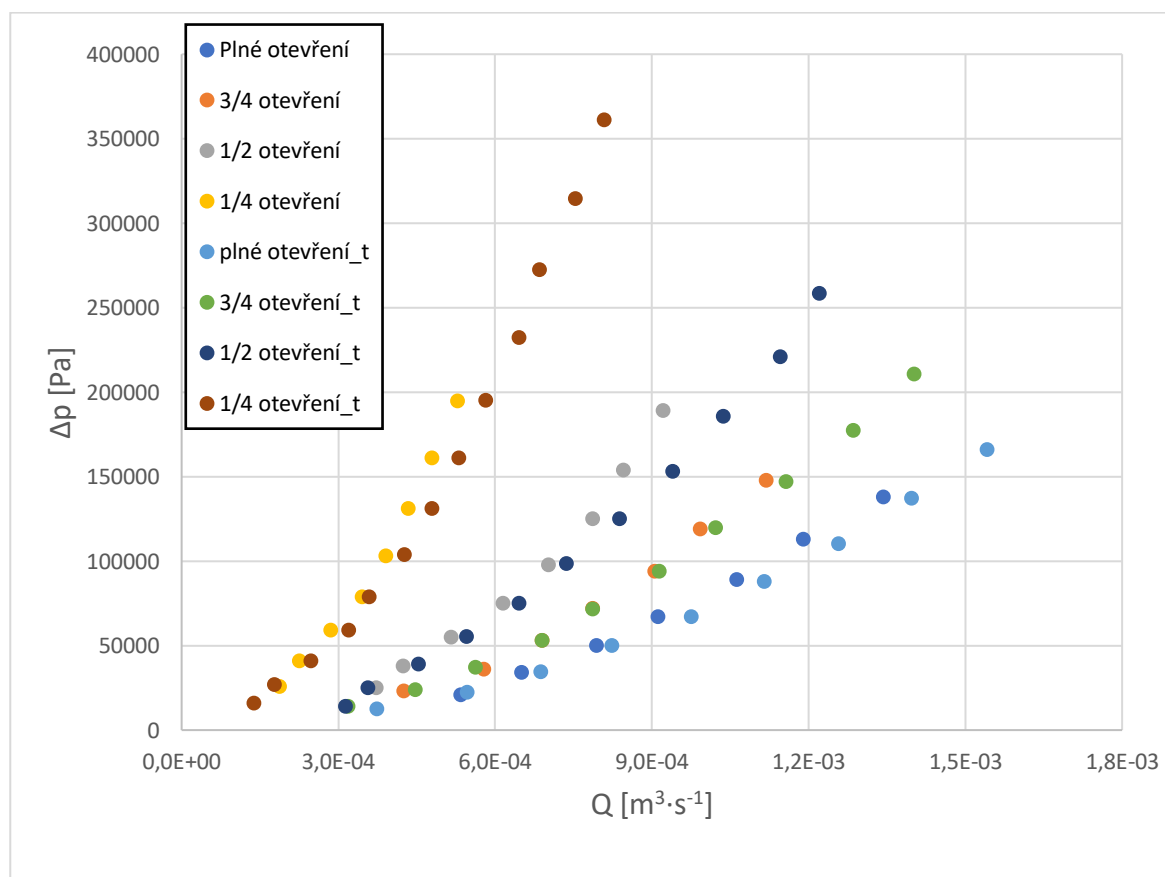


Obr. 128 Závislost jednotlivých součinitelů na Reynoldsově čísle pro ventil DN 25

## 5. Porovnání měření pro dvě různé teploty

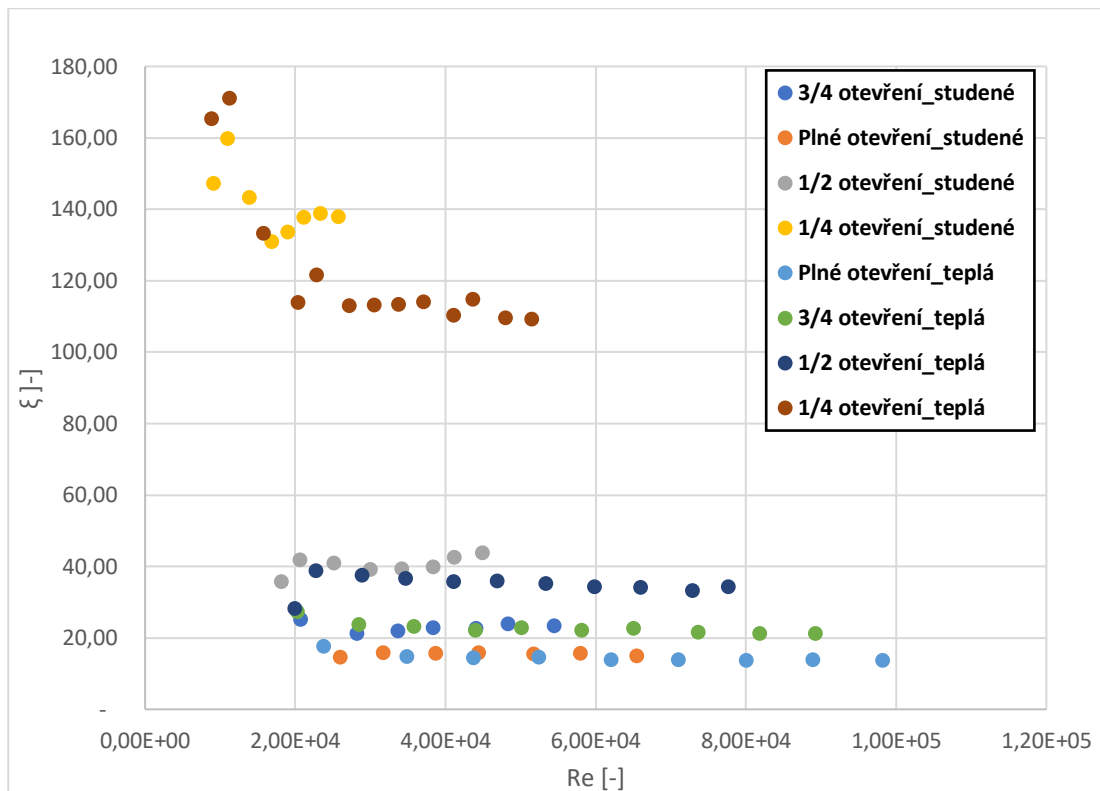
Měření s chladnou vodou proběhlo bezprostředně po napuštění nádrže vodou z řádu, která měla 11 °C. Měření proběhlo pouze na ventilu DN 25, proto je porovnáván. Tlaková ztráta roste nejrychleji u ¼ otevření, tudíž nejmenšího. Naopak nejpomaleji roste ztráta při plném otevření. Závislost tlakové ztráty je kvadraticky závislá na průtoku, což souhlasí s rovnicí 26. Pro označení prvního měření se studenou vodou jsem použil klasické označení podle zdvihu, pro druhé měření, kdy teplota vody byla 23 °C, je použit index „t“.

Změny jsou velmi malé, protože rozdíl teplot byl pouze 12 °C. Při tak malé změně teploty je i změna hustoty a viskozity vody minimální, a proto jsou rozdíly velmi malé. Měření však mohlo být zatíženo chybou průtokoměru a měřícího zařízení, což mohlo také ovlivnit velikost chyby. Pro přesnější měření by bylo potřeba přesnější průtokoměr. Nicméně všechny naměřené body pro teplejší vodu jsou vždy pod body pro studenou vodu. Z toho lze usoudit, že teplejší médium má menší ztráty.



Obr. 39 Porovnání tlakové ztráty pro různé teploty vody závislosti na průtoku pro DN 25

Na obr. 40 je znázorněna ztráta v závislosti na  $Re$ . Pro větší uzavření ventilu (1/4 otevřeno) je patrné, že ztrátový součinitel je menší pro teplejší kapalinu.



Obr. 40 Porovnání ztrátového součinitele pro měření ventilu DN 25 – pro teplou a studenou vodu

## 6. Přesnost měření

Cílem měření je zjistit skutečnou hodnotu, to se však nemůže nikdy prakticky podařit. Proto se udává přesnost měření, která říká, do jaké míry měřená hodnota odpovídá skutečnosti. Tuto odchylku vyjadřujeme nejčastěji celkovou chybou měření.

Tlakový snímač	+ - 3 %
Průtokoměr	+ - 0,5 %

Obr. 41 Rozsahy a přesnosti použitých měřidel

## Výpočet celkové chyby měřicího řetězce

$$S_x = \sqrt{\Delta s_1^2 + \Delta s_2^2} = \sqrt{3^2 + 0,5^2} = 3,04\% \quad (32)$$



## ZÁVĚR

Cílem práce bylo změřit a vyhodnotit charakteristiky regulačních ventilů na vodní trati. Na začátku práce jsem vypsál základní pojmy z teorie. Popsal jsem fyzikální vlastnosti kapalin – viskozita, hustota a následně atmosférický tlak. Dále jsem se věnoval základním zákonům jako je zákon zachování hmotnosti. V další kapitole jsem popsal druhy armatur využívané pro regulaci průtoku. Nejvíce jsem se věnoval uzavíracím ventilům, které jsou předmětem měření.

V teoretické části je věnováno mnoho prostoru pro vysvětlení průtokových součinitelů, jako je  $K_v$ ,  $A_v$  a  $C_v$ . Je zde porovnání součinitelů z evropských i amerických norem, ve kterých se uvádí průtok v galonech a tlak v psi jednotkách. V teoretické části lze najít vzorce pro výpočet všech součinitelů potřebných pro stanovení charakteristik ventilů a tabulku pro převod mezi nimi. Je zde i zmínka o kavitaci, jak jí předejít, i to, jaké může mít následky.

Vytvořil jsem výběr z norem, který slouží pro správné sestavení tratě. Při dodržení správných vzdáleností přímých trubek, popsaných na obr. 18, a jejich světlostí dojde k plnému vyvinutí turbulentního proudění, a tím se předejde chybám měření. Pro měření průtoku jsou kladeny podmínky přesnosti, které se musí pohybovat s úchytkou  $\pm 2\%$  od skutečné hodnoty. Tlakové odběry musí být navrtány do předem daných vzdáleností daných na obr. 18. Velikost vrtaného otvoru pro tlakový odběr je dán na obr. 15. Taktéž měření tlaku musí být provedeno kalibrovaným zařízením s přesností  $\pm 2\%$  naměřené hodnoty. Pro montáž zkušební vzorku je stanovena dovolená nesouosost daná na obr. 16. Sestavený měřicí obvod je vyfocen na obr. 19 a popsán v tabulce pod fotkou.

Sestavil jsem metodiku měření statických charakteristik ventilů a provedl jsem měření pro tři různé světlosti ventilu DN 25, DN 32 a DN 40. Každý ventil jsem měřil při 100% otevření a následně jsem uzavíral vždy o 25 % až do konečného otevření na 25 % původního otevření. Z naměřených hodnot jsem vypočítal tlakovou diferenci  $\Delta p$ , poté ztrátový součinitel  $\xi$ , průtokový součinitel  $K_v$ , Reynoldsovo číslo  $Re$  a kavitační číslo  $Ca$ . Hodnoty jsem zpracoval do  $\Delta p-Re$  charakteristiky. V práci je uvedena  $\Delta p-Re$  charakteristika pro plné otevření ventilů (obr. 29). Na základě tohoto grafu lze říct, že nejmenší ztráty byly naměřeny pro ventil DN 40, a naopak největší ztráty byly naměřeny pro ventil DN 25. V grafu  $\Delta p-Q$  (obr. 30) je dodržen trend zmenšujících se ztrát s rostoucí průtočnou plochou ventilu. Obecně lze říct, že čím větší průtok pro dané otevření, tím větší je tlaková ztráta. Po vyhodnocení ztrátového a výtokového součinitele (obr. 33) lze vidět, že čím menší je průtočná plocha ventilem, tím větší je ztrátový součinitel, naopak výtokový součinitel se

zmenšující se průtočnou plochou klesá. Závislost  $Ca-Re$  (obr. 34) znázorňuje vývoj kavitace ve ventilu DN 25. Pro vyšší Reynoldsova čísla a větší otevření ventilu se kavitace téměř neprojevuje, kdežto u otevření z 1/4 byla kavitace velmi zřetelně slyšitelná. V porovnání  $\Delta p-Q$  (obr. 35) je vidět, že nejrychleji roste tlaková ztráta pro nejmenší světlost ventilu a nejpomaleji roste ztráta pro ventil DN 40. Ze závislosti  $K_v-Re$  (obr. 36) je vidět, že součinitel průtoku  $K_v$  je konstantní pro všechny ventily a největší hodnoty nabývá pro ventil DN 40. Závislosti  $\xi-Re$ ,  $\mu-Re$  a  $K_v-Re$  (obr. 39) se vyznačují společným rysem, a to tím, že při vyšších Reynoldsových číslech jsou hodnoty konstantní. Při nižších  $Re$  výtokový součinitel roste, ztrátový součinitel mírně klesá a průtokový součinitel je konstantní při všech  $Re$ .

Na konec porovnání dvou měření pro různé teploty v závislosti  $\Delta p-Q$  (obr. 40) lze vidět, že teplotní rozdíl 12 °C je dostatečně malý pro minimální rozdíly hodnot. Při vyšších průtocích jsou rozdíly hodnot znatelnější, ale měření nebylo prováděno s dostatečně přesným průtokoměrem pro tak malé rozdíly, a proto mohla vzniknout chyba měření. Závislost  $\xi-Re$  (obr. 41) znázorňuje ztrátový součinitel v závislosti na  $Re$ . Při nižších hodnotách jsou odchylky dost velké, ale to je způsobeno nedostatečným rozvinutím turbulentního proudění, které je pro měření podmínkou. Při vyšších hodnotách Reynoldsova čísla se hodnoty ztrátového součinitele přibližují a chyba je minimální.

V budoucnu může práce sloužit pro matematické modelování proudění kapaliny ve ventilech. Dále může být použita metodika měření charakteristik armatur. Práce může také sloužit pro přesnější měření vibrací, hluku a určení kavitace na ventilech.

## Citace

- [1] JANALÍK, J.; ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin*. VŠB-TUO, Ostrava, 2002, 125 s. ISBN 80-248-0038-1
- [2] DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin*: [online]. Ostrava, 2007, 257 s. [cit. 2015-05-05]. ISBN 978-80-248-1508-4. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>
- [3] ČSN EN 1267 *Průmyslové armatury – Měření průtokových ztrát s použitím vody jako zkušební tekutiny*. Srpen 2012.
- [4] ČSN EN 60534-2-3 *Regulační armatury pro průmyslové procesy – Část 2–3: Průtok – Zkušební postupy*. Prosinec 1999.
- [5] ROČEK, J. *Průmyslové armatury*. Praha: Nakladatelství Informátorku, spol. s.r.o., 2002, 204 s.
- [6] DOUBRAVA, J. a kol. *Regulační armatury*. Česká Třebová: LDM, spol. s r.o., 2006, 168 s.
- [7] ZAPPE, R.W. *Valve selection handbook*. 4. vyd. Gulf Publishing Company, Houston, ISBN 0-88415-886-1
- [8] *Manual of Water Supply Practices. Quarter-Turn Valves: Torque, Head Loss, and Cavitation Analysis*. M49, 3. vyd. 147str. 2017, American Water Works Association.
- [9] BAROŠKA, J. *Hydrostatické mechanizmy*. Žilina: Hydopenutech s.r.o., 2012, 388 s.

## PODĚKOVÁNÍ

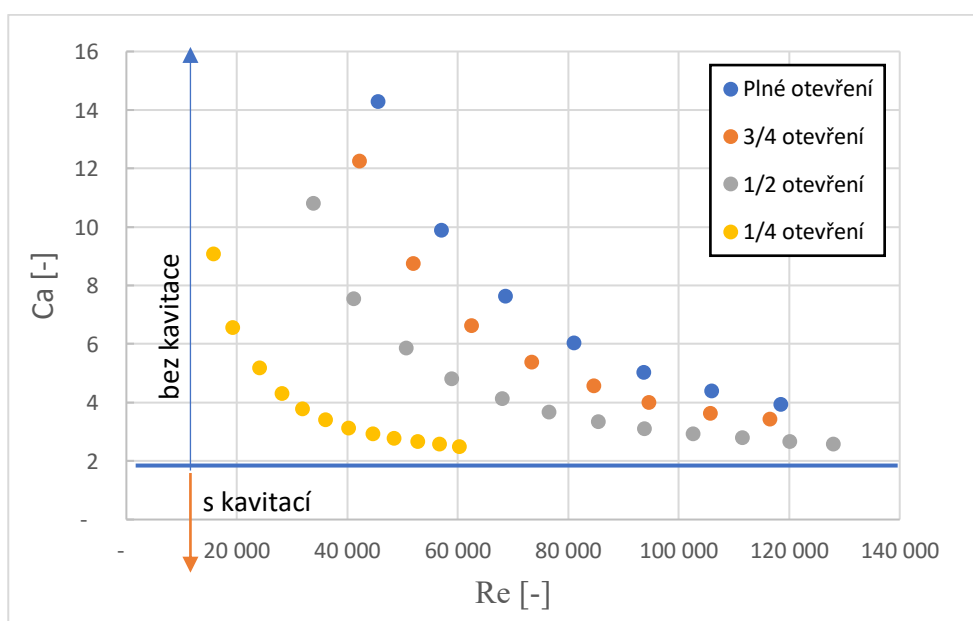
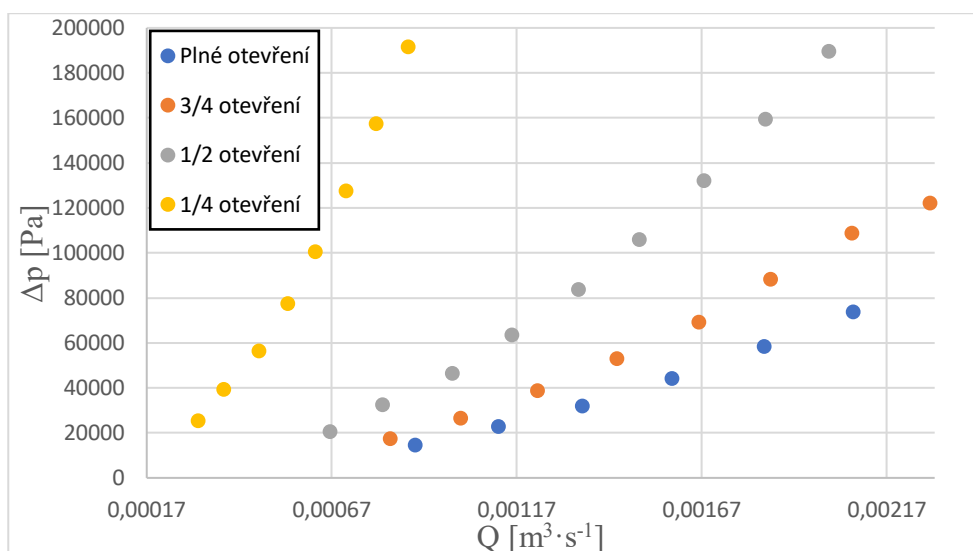
Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí práce paní Ing. Janě Jablonské, Ph.D. za odbornou pomoc a nepostradatelné rady při psaní bakalářské práce.

## Přílohy

TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT pro plné otevření ventilu DN 32

$f$	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$Q$	$\xi$	$K_v$	$Re$	$Ca$	kavitace
[Hz]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	[-]	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	[-]	[-]	
8	107325	92725	14600	0,0009	8,81	8,43	45582	14,30	
10	115325	92625	22700	0,0011	8,74	8,46	57041	9,90	
12	124325	92525	31800	0,0013	8,47	8,60	68585	7,63	
14	136325	92125	44200	0,0016	8,45	8,61	80978	6,03	
16	150325	91925	58400	0,0018	8,35	8,66	93626	5,05	
18	165325	91525	73800	0,0021	8,24	8,72	103934	4,40	ano
20	181325	91025	90300	0,0023	8,06	8,81	118496	3,95	ano

## GRAFY



TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT pro plné otevření ventilu DN 40

$f$	$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$Q$	$\xi$	$K_v$	$Re$	$Ca$	kavitace
[Hz]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	[-]	[m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ]	[-]	[-]	
10	101325	95025	6300	0,0015	3,85	20,89	57959	21,23	
12	104325	95325	9000	0,0018	3,69	21,34	70758	22,52	
14	108325	96125	12200	0,0021	3,73	21,21	81898	17,27	
16	113325	96825	16500	0,0024	3,8	20,95	94034	13,38	
18	118325	97725	20600	0,0027	3,70	21,31	106899	11,2	
20	124325	98028	26300	0,0030	3,83	21,04	119234	9,23	
22	131325	98825	32500	0,0033	3,84	20,91	131767	7,9	
24	138325	99825	38500	0,0036	3,83	20,94	143637	7,03	
26	146325	100825	45500	0,0039	3,84	20,93	156038	6,3	
28	154325	101925	52400	0,0042	3,80	21,03	168240	5,78	
30	163325	103225	60100	0,0045	3,81	20,99	179845	5,34	

GRAFY

